Szerkezetvizsgálat kozmikus részecskék segítségével

SZAKDOLGOZAT

Oláh László* II. Fizikus MSc hallgató ELTE TTK

Témavezetők:

dr. Barnaföldi Gergely Gábor MTA Wigner FK RMI Elméleti Fizikai Főosztály

dr. Varga Dezső ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Budapest, 2012.

* laszlo.olah@cern.ch

Tartalomjegyzék

Be	evezető	1
1.	Alkalmazott kutatások kozmikus részecskékkel 1.1. Régészeti kutatások kozmikus müonokkal	2 2 4
2.	A müontomográf felépítése 2.1. A CCC kamrák szerkezete és működése 2.2. Környezeti elszigetelés és a gázrendszer 2.3. Adatgyüjtő rendszer és front-end elektronikák 2.4. Triggerelektronika	7 8 9 10 12
3.	Adatfeldolgozás és Monte Carlo szimulációk3.1. Detektorból kiolvasott jelek struktúrája3.2. Esemény alapú adatfeldolgozás3.3. A müontomográf vizsgálata Monte Carlo szimulációval	13 13 14 21
4.	Detektor tesztek 4.1. Ólomtorony leképezése kozmikus müonokkal 4.2. Müonhozam-mérések a Jánossy-aknában 4.3. Molnár János-barlang feletti domborzat rekonstrukciója	25 26 27 30
5.	Rejtett üregek keresése az Ajándék-barlangban5.1. Az Ajándék-barlang feltérképezése és a detektor elhelyezése	32 32 34 36
Ko	onklúziók és összefoglalás	40
Ki	tekintés	42
Kö	szönetnyilvánítás	43
A.	A kozmikus müonok zenit-szög és impulzus eloszlása	47

Bevezető

Szakdolgozatom elkészítése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó REGARD (RMKI ELTE GAseous detector Research and Development) csoport munkájába. Célunk egy olyan detektor kifejlesztése és megépítése volt, amellyel megmérhetjük a kozmikus müonok fluxusát, így több pontból történő méréssel és a domborzati viszonyok ismeretében következtethetünk a detektor feletti anyag eloszlására. Ezzel az eljárással kimutatható ha kiterjedtebb kőzet-inhomogenitás vagy üreg található a detektor felett. A detektorban 4 darab, két dimenzióban érzékeny, ún. közelkatódos kamrát (Close Cathode Chamber, CCC) használunk, amelyeket Varga Dezső és Hamar Gergő tervei alapján készítettünk el. A detektor kamráihoz elkészítettük a kamrák jeleinek kiolvasására alkalmas elektronikákat, amelyekkel egyidejűleg olvashatók ki az analóg és digitális jelek.

Diplomamunkám során részt vettem a CCC kamrák és a müontomográf építésében, a detektor mérésekkel történő kalibrálásában, alkalmazási lehetőségeinek és korlátainak feltárásában, valamint geológiai használhatóságának igazolásában. A feladatokat önállóan írt kiértékelő programmal és Monte Carlo szimulációval valósítottam meg.

Szakdolgozatom elején a kozmikus müonok alkalmazott kutatásokban történő felhasználásáról írok. Dolgozatom második fejezetében bemutatom a CCC kamrákból összeállított müontomográf szerkezetét és működését. A harmadik fejezetben ismertetem a CCC kamrák jeleit analizáló programot és a detektor működését modellező Monte Carlo szimulációt. A negyedik fejezetében bemutatom a detektorteszteket, amelyet az MTA Wigner FK RMI gázdetektor-laboratóriumában, az KFKI Kampusz területén található Jánossy-aknában és a budapesti Molnár János-barlangban végeztünk el. Szakdolgozatom utolsó fejezetében ismertetem a Pilisben található Ariadne-barlangrendszerben történő méréseket és közlöm a mérések kiértékelésének eredményeit és azokból levont következtetéseimet.

1. Alkalmazott kutatások kozmikus részecskékkel

A kozmikus sugárzás létezését V. Hess híres kísérlete igazolta 1912-ben, éppen 100 éve: légballonnal juttatott fel a légkörbe (tengerszint feletti 5350 m magasságig) egy elektroszkópot, amely kisülésének időtartamát vizsgálta különböző magasságokon [1]. A mérések eredményei azt mutatták, hogy az emelkedés magasságának növelésével nő az elektroszkóp töltésvesztesége, azaz az elektroszkópot kisütő ionizáló sugárzás égi eredetű.

A XX. század második felére már kellően ismertté váltak a kozmikus sugárzás tulajdonságai ahhoz, hogy a megismert sugárzást alkalmazott kutatásokban is felhasználják. Az első alkalmazás E. P. George és munkatársai nevéhez köthető, akik az ausztrál hegyekben hórétegek vastagságát próbálták megmérni [2]. Azóta számos további alkalmazás született, kezdve rejtett kamrák keresésétől építményekben, régészeti feltárásokban [3, 4, 5], vulkánok tevékenységének vizsgálatán át [6, 7, 8, 9, 10], a nemzetvédelmi megvalósításokig [11]. Tekintsünk ezek közül néhányat az alábbiakban!

1.1. Régészeti kutatások kozmikus müonokkal

1965-ben merült fel az ötlet, hogy kozmikus részecskék vizsgálatára épített berendezéseket használjanak régészeti feltárásokra. Az első ilyen kutatás célja a Gízai Piramisok szerkezetének vizsgálata volt. A Piramis Programot 1966. június 14-én Luis W. Alvarez és csoportja indította el [3]. Következő év tavaszára a Khepren Piramisban található Belzoni Kamrában felépítettek egy kozmikusrészecske-detektort. A Belzoni kamra felett az eddig ismert Királyok Kamrája mellett még további kamrák jelenlétét feltételezték, ezeket szerették volna megtalálni a detektor segítségével. Az eljárás nagy előnye, hogy a kozmikus sugárzás nem roncsolja a piramis szerkezetét.

Az Alvarez és munkatársai által épített kísérleti berendezés a 1. ábrán látható, amely két egymástól 30 cm-re lévő 1,8 m × 1,8 m felületű szikrakamrából állt. Felettük és közöttük egy-egy, az alsó alatt pedig két szcintillációs számláló volt elhelyezve. A szcintillátorok koincidenciája triggerelte a mérést. Továbbá a két alsó szcintillátor között egy 1,2 m vastagságú vas réteg volt, amely minimálisra csökkentette a beérkező müonok másodlagos szórásának hatását a piramis anyagának jelentős részét alkotó mészkőben. A berendezés segítségével 3° pontossággal mérték a müonok beérkezési szögét.

A mérések során mintegy egymillió eseményt gyűjtöttek. Néhány hónap után, a piramis térfogatának 19 %-át térképezték fel. Közel fél éves adatgyűjtés után, pedig már látható volt a piramis négy sarka és külső jellegzetességét adó mészkő "sapka" is. Később pedig egyértelműen sikerült meghatározniuk, hogy a piramisban található két kamrán kívül nincsenek további ~ 2 m-nél nagyobb méretű üregek.



1. ábra. A Khepren piramis Belzoni kamrájában összeállított detektor szikrakamrákkal és szcintillátorokkal [3].

A Mexikói Állami Egyetem munkatásai 2007-től egy az Alvarezéhez hasonló módszerrel kezdték el feltárni a Teotihuacanban található Nap Piramist [4, 5]. Abban a szerencsés helyzetben voltak, hogy a piramis alatt található egy alagút, ahová beépíthették kísérleti berendezésüket. Azonban az egyiptomi mérésekhez képest volt néhány nehézség is: a piramis alakja nem szabályos, az anyagi összetétele nem homogén¹.

A kísérleti berendezésüket két egyenként 1 m² felületű szcintillátor lemezből és hat darab sokszálas proporcionális kamrából (Multiwire Proportional Chamber, MWPC) építették fel. Ezzel az összeállítással kezdetben az alapvető kísérleti paraméterek meghatározására koncentráltak, mint például felbontás és hatásfok. Az első tesztek alapján meghatározták a helyi müon spektrumot, a piramis külső alakját és belső szerkezetét. A mérések eredményéül azt kapták, hogy nincs ~ 1 m-nél nagyobb üreg a piramisban.

 $^{^1}$ További nehézséget okozott a kísérleti berendezésük működéséhez szükséges áramellátás biztosítása. A terület UNESCO védettsége miatt ezt, a föld alatt, 2 km hosszan elhelyezett kábelekkel oldották meg.

1.2. Vulkáni tevékenység vizsgálata

A vulkánok belső szerkezetének ismerete fontos ahhoz, hogy megértsük azok működését ill. előrejelezzük a következő kitörés jellegét és időpontját. A hagyományos geofizikai módszerek – mint pl. a mélyfúrás vagy a szeizmikus tomográfia – alkalmazhatóságának határt szab a térfelbontás, amely skálája néhány 10 m-től akár 1 km-ig is terjed [6]. További nehézség, hogy a vulkán nem közelíthető meg a vulkáni tevékenység során keletkező mérgező gázok és forró környezet miatt. Ezek ismeretében jó ötletnek ígérkezik, hogy az aktív vulkánok belső szerkezetének feltérképezésére kozmikus müonokat használjuk, hiszen ezzel a módszerrel jobb felbontás érhető el, mint a hagyományos geofizikai eljárásokkal. A müontomográfiás módszer alkalmazhatóságát K. Nagamine és csoportja bizonyította: egy szcintillátorokból és fotoelektron sokszorozókból épített müonteleszkóp segítségével határozták meg a Tsukuba-vulkán sűrűségeloszlását a 90-es évek közepén [7]. Ennek nyomán a belső szerkezet meghatározásának fontos eszközévé nőtte ki magát a müontomográfiás módszer.

Egy évtizeddel később H. Tanaka és csoportja végzett méréseket ezzel a módszerrel az Asama-vulkánnál [8, 9]. Azt várták, hogy képet kapnak a vulkán belső szerkezetéről és a benne található anyag sűrűségének eloszlásáról a rajta keresztülhaladó illetve a benne elnyelődő müonok segítségével. Tanakáék 2 darab egymástól 1,5 m távolságra elhelyezkedő, párhuzamos plasztik szcintillátorból felépített müonteleszkópot helyeztek el a vulkán krátertől 3 km-re. A szcintillátorok egyenként 10 darab 10 cm \times 100 cm nagyságú felületekre voltak szegmentálva (lásd 2. ábra). A berendezésük szögfelbontása 66 mrad volt, azaz a krátertől 3 km-re elhelyezett berendezésükkel 200 méteres pontossággal mérhették meg a vulkán vastagságát.



2. ábra. Az Asama-vulkán lábánál elhelyezett detektor vázlata [8].

A berendezés alkalmas volt azon oldalak kőzetrétegeinek a tanulmányozására is, amelyek nehezen megközelíthetők, így szerkezetük nem volt meghatározható a hagyományos szeizmikus vagy elektromágneses módszerekkel. Müonteleszkópukkal 85000 kozmikus müont mértek 3 hónap alatt, így sikerült meghatározniuk a vulkán sűrűségét mintegy 30 % pontossággal.

2007-től kezdődően H. Tanaka és csoportja további méréseket végeztek a detektor továbbfejlesztett változatával a Satsuma-Iojima-vulkán lábánál. A berendezésük 2 darab, egymástól 1 méter távolságra, párhuzamosan elhelyezett 1 m² felületű szcintillációs detektor volt. A szcintillációs detektorok 12 × 12 darab, egyenként 64 cm² felületű egységekre volt szegmentálva. Berendezésük szögfelbontása 16 mrad volt, azaz a vulkán krátertől 1,2 km távolságra elhelyezett detektorukkal kb. 20 méter pontossággal mérhették meg a vulkán vastagságát. A detektor -320 mrad és 640 mrad közötti zenit-szög tartományban, valamint -480 mrad és 480 mrad közötti azimut-szög tartományban detektálta a kozmikus müonokat.

Egy hónapos mérés során 1,3 millió kozmikus müont mérve már egyértelműen elkülöníthették a kürtőben a láva sűrűségét a vulkánt alkotó kőzetek sűrűségétől (lásd 3. ábra). A sűrűséget 3,2 % pontossággal adták meg, így ezzel a módszerrel jóval pontosabban meghatározható egy vulkán belső szerkezete, mint az eddig alkalmazott geofizikai módszerekkel [10].



3. ábra. A Satsuma-Iojima-vulkán leképezése kozmikus müonokkal. Jól elhatárolható a $\sim 1.9 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű láva kürtő a 2,5 g/cm³ átlagsűrűségű kőzettől [10].

Az előbbi alkalmazások alapján jól látszik, hogy a kozmikus müonok jól használhatók a detektor feletti anyag nagyléptékű struktúrájának meghatározására. A továbbiakban ezt az elvet szeretném felhasználni. Diplomamunkám egyik célja, hogy egy a felsoroltakhoz hasonló, ám azoknál jelentősen költséghatékonyabb, mobilisabb, infrastruktúrára, energiafelhasználásra és emberi felügyeletre nézve szerényebb igényű, a jelenlegiek precizitását meghaladó berendezést építsek, amely alkalmas földalatti üregek (pl. rejtett barlangi járatok) vagy kiterjedtebb kőzet-inhomogenitások keresésére és vizsgálatára.

2. A müontomográf felépítése

Egy kozmikusrészecske-detektor megtervezésénél törekedni kell a detektor érzékeny felületének maximalizálására, azonban környezeti alkalmazások esetén a hordozhatóság limitálja ezt a detektáló felületet. Egy kozmikusrészecske-detektor felületének a lehető legnagyobbnak kell lennie, hogy rövid idő alatt is kellő számú részecskét detektáljon, azonban egy barlang belsejébe csak limitált méretű és súlyú detektort vihetünk be. Az épített berendezést – a későbbiekben az 5. fejezetben tárgyalt – Ajándék-barlangba tervezett mérésekre optimalizáltuk. A detektor méretei 51 cm × 46 cm × 32 cm, tömege ~ 13 kg.

A 4. ábrán látható a müontomográf, amely 4 darab egymás alatt párhuzamosan elhelyezett közelkatódos kamrából (Close Cathode Chamber, CCC) épül fel. A detektoron keresztülhaladó részecske pályája már 2 kamrával is mérhető lenne, azonban a kamrák elektronikus zaja csökkentené a szögmérés pontosságát. A detektoron keresztülhaladó részecske pályája (kék nyíl) megadható 2 szöggel: zenit-szög (θ) és azimut-szög (φ).



4. ábra. A müontomográf szerkezete, a müonok pályájának θ és φ szöge.

A detektor további fontos részei a kis- és nagyfeszültséget biztosító modulok, az adatgyüjtő rendszer valamint a detektorjeleket kiolvasó front-end elektronikák és a triggerelektronikák. Az adatgyüjtő rendszer megtervezése és megépítése nem volt része diplomamunkámnak, azonban a detektor működésének megértése érdekében elengedhetetlen az ismertetése. Jelen fejezetben bemutatom a detektor alapját képező CCC kamrákat, a gázrendszert valamint az adatgyüjtő rendszert és az elektronikákat.

2.1. A CCC kamrák szerkezete és működése

A gáztöltésű detektorok működésének alapja az ionizáció mérése. Az ionizáció folyamatos fenntartása érdekében nagy tisztaságú gázt áramoltatunk keresztül a detektorok érzékeny térfogatán. A nagyenergiás részecskék gázdetektoron történő áthaladásuk során ~ 100 elektront hoznak létre centiméterenként. Ez a töltésmennyiség rendkívül kevés ahhoz, hogy megkülönböztethessük az elektromos feldolgozórendszer háttérzajától. Ennek a problémának első sikeres megoldási kísérlete a Geiger-Müller-cső volt. Maga az ötlet az, hogy a középen elhelyezett szál közelében kialakuló nagy elektromos térerősségben az elektronok annyira felgyorsulnak, hogy képesek lesznek újabb ionizációra. Majd az így keletkezett elektronok szintén felgyorsulnak, újabb ionizáció történik és kialakul az elektronlavina, amely már jól mérhető töltésmennyiséget ad.

A fenti elvet felhasználva G. Charpak 1968-ban alkotta meg az ún. sokszálas proporcionális kamrát (Multi-Wire Proportional Chamber, MWPC), amely elődjéhez képest kisebb feszültséget és több, $20 - 30 \,\mu\text{m}$ vastagságú szálat használ [12]. MWPC-ben a lavina által elérhető erősítés tipikusan $10^4 - 10^5$, így a szálakon $10^6 - 10^7$ elektron jelenik meg, amely megfelelő erősítés után alkalmas detektálásra [13].

Varga Dezső és Hamar Gergő továbbfejlesztette ezt a konstrukciót, majd 2009-ben megépítették az első CCC kamrát [14]. A CCC kamrák legfontosabb tudományos előnyei az eddig használt sokszálas proporcionális kamrákkal szemben, hogy könnyű szerkezetűek (100-150 g/kamra) és egyszerűen szerelhetők, mivel toleránsabbak az apró (10-100 μ m nagyságrendű) deformációkkal szemben.

A müontomográf kamrái is CCC technológiával készültek. Ezek megépítését Hamar Gergő segítségével végeztem el. A kamrák építésének általános folyamatát korábbi munkámban tárgyalom [15]. Az épített kamrák mérete 32 cm × 32 cm × 1 cm, melyeken folyamatosan Ar és CO₂ gázok keverékét áramoltatjuk át. A kamrák szálsíkjában 2 féle szálat alkalmazunk (lásd 5. ábra): 100 μ m vastagságúak a térformáló szálak és 21 μ m vastagságúak az anódszálak, amelyek közös kivezetéséről analóg jel is kiolvasható. A szálaktól kb. 1,5 mm távolságra elhelyezkedő alsó katódot a szálakra merőleges futású, 4 mm × 320 mm méretű parkettákkal (pad) szegmentáltuk. A térformáló szálakon a pozitív ionok mozgása következtében pozitív jelek alkulnak ki (Shockley-Ramo tétel) [16], továbbá a pozitív ionfelhő tükörtöltése megjelenik a parkettákon. Ennek következtében CCC kamráink alkalmasak egy időben történő digitális jelkiolvasásra a térformáló szálakon és a parkettákon.



5. ábra. A CCC kamra belső szerkezete [14].

2.2. Környezeti elszigetelés és a gázrendszer

A detektort magas (akár 100 %) páratartalmú környezetben is terveztük üzemelni, ezért a készüléket egy plexi dobozba helyeztük, amely biztosítja a környezeti elszigetelést és a megfelelő mechanikai stabilitást. A detektor működéséhez nélkülözhetetlen a megfelelő gázkeverék folyamatos áramoltatása. Erre a célra Ar és CO₂ gázkeveréket használunk 80:20 arányban. Az Ar nemesgáz, külső elektronhéja teljesen betöltött, ezért a kémiai reakciókban nem vesz részt. Emellett az Ar csak egyatomos molekulákat alkothat, így nem rendelkezik rezgési és forgási módusokkal, ezért az Ar gázban az ionizáció során keletkezett, majd sodródó elektronok csak rugalmasan ütközhetnek. Ez kisebb energiaveszteséget jelent, tehát már alacsonyabb feszültségen ($\sim 1 \, \text{kV}$) elindul a sokszorozás. A sokszorozás során az Ar atomok gerjesztődnek, az így kialakuló energiatöbbletet 11,6 eV energiájú UV fotonok kibocsátásával adják le. Ezek az UV fotonok beleütköznek a Cu katódba, amely ionizációs küszöbe 7,7 eV, így a katód felületéről elektronok lépnek ki. Ennek következtében a sokszorozás önfeltartóvá válna, így detektorunk működésképtelen lenne. Ennek megelőzésére alkalmazzuk a CO_2 gázt, ugyanis a CO_2 (más szén-hidrogénekhez hasonlóan) alkalmas az UV fotonok elnyelésére [17]. További előnyei a választott gázoknak, hogy nem éghetők és olcsók.

A magas páratartalom koronakisüléséket okozhat a CCC kamrákban, ami káros az elektronikákra. Ennek megelőzéséért a detektorból kiáramló gázkeveréket visszavezetjük a kamrákat tartalmazó plexi doboz belsejébe, ezzel 30 % és 50 % közötti értékre csökkentve a páratartalmat². A gázkeveréket egy 10 liter űrtartalmú, 150 bar nyomású gázpalack biztosítja. Környezeti alkalmazásnál a gáz egy 100 m hosszúságú csővel jut el pl. a barlang bejáratánál elhelyezett gázpalacktól a detektorig. A gázáramlást tipikusan 1,5 l/h és 5 l/h közötti értékekre állítjuk be, így esetünkben ~ 20 napig elegendő egy gázpalack.

 $^{^2\}mathrm{A}$ belső páratartalom \sim 20 %-kal csökken az elektronikák hőkibocsátása miatt.

2.3. Adatgyüjtő rendszer és front-end elektronikák

Jelen alfejezetben ismertetett adatgyüjtő egység megtervezése és megépítése nem volt része a diplomamunkámnak, ezeket Melegh Hunor Gergely végezte el [18]. Az adatgyüjtő rendszer megtervezésénél fontos szempont volt a fogyasztás minimalizálása és a hordozhatóság. Az általában elkülönülő elektronikai egységek egy modulba lettek beépítve. A hely kihasználása okán a modult a középső CCC kamrák közé helyeztük el. A 6. ábrán látható blokkvázlat mutatja az integrált egységet.



6. ábra. Az adatgyüjtő és nagyfeszültségű egységek blokkvázlata a processzor egységgel, a nagyfeszültségű tápegységgel és a kezelő felülettel [18].

Processzor egység irányítja a többi egységet. Az integrált modul egy 12 V-os tápegységről működik. Egy kapcsolóüzemű tápegység állítja elő az egyes modulok működéséhez szükséges 5 V tápfeszültséget. A CCC kamrák működéséhez szükséges nagyfeszültséget egy American High Voltage nagyfeszültség egység szolgáltatja [19]. Az eredetileg 300 – 1200 V feszültséget biztosító egység egy feszültségosztó áramkör segítségével állítja elő az anód-szálnak az 1100 V valamint a katódnak és térformáló szálaknak a –600 V feszültségeket. Az anódszálak által felvett áram ~ 20 nA, így a nagyfeszültségű tápegység fogyasztása elhanyagolhatóan kicsi.

A kamrákon átfolyó áramokat monitorozzuk, ami lehetőséget biztosít a megnövekedett páratartalom következtében fellépő koronakisülésék jelzésére is. A müontomográf teljes áramfelvétele 380 mA 12 V feszültségen, azaz a teljes redszer fogyasztása kisebb mint 5 Watt. Ezzel számolva, detektorunk egy 50 Ah fogyasztású akkumulátorral több mint 5 napig üzemelhet. Az 5 Watt fogyasztás magába foglalja a nagyfeszültségű tápegység, a kamrák, a triggerelektronikák, a front-end elektronikák, az adatkiolvasás és a kezelőfelület fogyasztását. Detektorunk fogyasztása 1-2 nagyságrenddel kisebb mint a napjainkban használatos, hasonló alkalmazásokra (lásd az 1. fejezetben) épített detektorainak fogyasztása.

A front-end elektronikákat (lásd 7. ábra) Varga Dezső tervei alapján készítettük el. Ezek standard CMOS³ technológiával készült elektronikákon alapulnak. Az egyes elektronikákon 16 csatorna van, így összesen 10 darab elektronika szükséges egy kamra kiolvasására. A front-end elektronikák erősítik és diszkriminálják a CCC kamrák jeleit. Fogadják az adatgyüjtő egységről érkező triggerjelet és eltárolják a kamrákból kiolvasott biteket a shift regiszterbe. Az adatgyüjtő rendszer és a front-end elektronikák közötti soros kommunikáció órajel-frekvenciája 2 MHz.

Egy triggerelt esemény 640 bit memóriát foglal le. A PIC32 alapú adatgyüjtő rendszer 32 kB belső memóriával rendelkezik. Az adatgyüjtő rendszer 100 eseményenként (~ 8 kB) írja ki összegyűjtött biteket egy SD kártyára. Az SD kártyán található FAT16-os fájlrendszer 2 GB memóriát biztosít, amely ~ 10 millió esemény tárolását teszi lehetővé. Ezekkel a paraméterekkel, detektorunk 2 hónapig mérthet folyamatosan 10 méter földekvivalens mélységen anélkül, hogy SD kártyát cserélnénk benne.



7. ábra. A detektorjelek erősítését és diszkriminálását végző DIN 316 típusú (Digitális INverter, 3 fokozatú, 16 csatornás) front-end elektronika.

³IC építési technológia: Complementary Metal-Oxide Semiconductor, komplementer fém-oxid félvezető.

2.4. Triggerelektronika

Az adatgyüjtő rendszert egy triggerjel indítja, amely jelzi a detektoron keresztülhaladó részecskéket. Esetünkben a CCC kamrák anódszálainak közös jele biztosít triggerjelet az adatgyüjtő rendszernek. A triggerrendszer úgy került kialakításra, hogy ne legyen szükség további detektorelemek (pl. szcintillációs számlálók) hozzáadására, amelyek növelnék a detektor súlyát és fogyasztását.

Az egyes kamrákban az anódszálak egymáshoz kapcsolódnak, így amikor keresztülmegy rajtuk egy részecske, minden CCC kamra ad egy analóg jelet. Ezek a jelek a front-end elektronikákkal történő erősítés és diszkriminálás után egy S_i TTL kompatibilis jelet adnak (ahol i = 1,2,3,4). Az adatgyüjtő rendszer akkor indítja el a kiolvasási ciklust, amikor felső két kamra és az alsó két kamra közül legalább egy-egy egyszerre jelzi az áthaladó részecskét, tehát a kamrák a következő T triggerfeltételnek tesznek eleget:

$$T = (S_1 + S_2) \cdot (S_3 + S_4), \qquad (1)$$

ahol '+' a 'VAGY' és '.' az 'ÉS' logikai műveleteket jelentik.

A triggerrendszer hatásfokának maximalizálása a mérések egyik kulcsa, hiszen a triggerelt események számának növelése csökkenti a mérés idejét, ezzel együtt a detektor energiafelhasználását. A müontomográf triggerhatásfokának meghatározásához és optimalizálásához legyen az egyes kamrák triggerhatásfoka az egy eseményre vonatkozó triggerelés valószínűsége ϵ_n , ahol n=1,2,3,4. Így az ϵ teljes triggerhatásfok az alábbi kifejezéssel adható meg:

$$\mathbf{f} = [1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)] \cdot [1 - (1 - \epsilon_3)(1 - \epsilon_4)], \qquad (2)$$

Az egyes kamrák ϵ_n triggerhatásfokát méréssel határoztam meg. Mérést végeztem 4 triggerelektronikával valamint azokban az esetekben is amikor egyes kamrákról eltávolítottam a triggerelektronikákat. Az első kamráról eltávolítva a triggerelektronikát a triggerfeltétel $S_2 \cdot (S_3 + S_4)$ -nek adódik. Ebben az esetben a teljes triggerhatásfok:

$$\epsilon_1' = \epsilon_2 \cdot \left[1 - (1 - \epsilon_3)(1 - \epsilon_4)\right] \,. \tag{3}$$

 ϵ'_n a triggerhatásfok abban az esetben, amikor az *n*-edik front-end elektronikát távolítjuk el.

Minden *n*-re kifejezhető az ϵ'_n/ϵ arány, amelyek a teljes rendszer ϵ triggerhatásfokának meghatározásához vezet. A mérésekből a teljes rendszer triggerhatásfoka $\epsilon = 93,1\%$, az egyes kamrák triggerhatásfoka $\epsilon_n = 80\% \pm 1\%$.

Az $1 - \epsilon$ triggerhatásfok veszteség egyenesen arányos a detektoron keresztülhaladó, de nem detektált részecskék számával. Méréseink alapján, több hónapos adatgyűjtés alatt a triggerhatásfok nem mutatott jelentős változást, azonban azt tapasztaltuk, hogy bizonyos esetekben függhet pl. a gázáramlástól (lásd az 5. fejezetben).

3. Adatfeldolgozás és Monte Carlo szimulációk

A 2. fejezetben bemutattam a müontomográfot mechanikai és elektronikai szemszögből. Jelen fejezetben a detektor azon paramétereit ismertetem, amelyekhez már elengedhetetlen az adatgyűjtő rendszerből kiírt digitális jelek feldolgozása. Bemutatom az adatgyűjtő rendszerből kiírt adatok szerkezetét, és az előanalízis fontosságát. Ismertetem az analízis menetét, majd a detektor és mérések vizsgálatára készített Monte Carlo szimulációról írok. Ezek elkészítése volt jelen diplomamunkám fő célja. Az adatfeldolgozó programokat és a Monte Carlo szimulációt objektum orientált C++ nyelven írtam meg, így azok könnyen bővíthetők és szélesebb körben használhatók a későbbiekben is.

3.1. Detektorból kiolvasott jelek struktúrája

Az adatgyűjtő rendszer az adatokat "txt" kiterjesztésű fájlokba írja ki. Minden fájl 20 000 eseményt tartalmaz. A fájlok minden sora egy-egy eseménynek felel meg, ahol a számok jelentése a következők (lásd 8. ábra):

- Az első szám az események sorszámát jelöli.
- A második szám az előző esemény óta eltelt időt adja meg $\mu {\rm s}{\rm -ban}.$
- A harmadik számtól kezdve minden szám egy-egy elektronika "megszólalásának" felel meg. Ha 2-es számrendszerbe alakítjuk ezeket a számokat, akkor láthatjuk az egyes front-end elektronikacsatornák "megszólalását". Az első 5 szám a legalsó kamra térformáló szálaihoz tartozik, azt követő 5 szám a legalsó kamra parkettáinak csatornáihoz, majd a következő 5 5 szám a felette elhelyezett kamrák térformáló szálainak és parkettáinak "megszólalását" mutatja. A detektor 4 kamrából épül fel, tehát összesen 40 szám mutatja a CCC kamrák parkettáinak és térformáló szálainak jeleit.
- A 43. számtól következnek a környezeti paraméterek (a plexidobozon kívül, belül és az adatgyűjtő rendszeren mért páratartalmak, hőmérsékletek valamint a külső nyomás). Itt rögzítjük a detektor tápfeszültségét, áramait és az akkumulátor töltöttségét.
- Megj.: Monte Carlo szimulációval generált események esetén további 2 szám kerül a sorok végére: a generált részecske pálya parketta irányú meredekségének és térformáló szál irányú meredekségének ezerszeresei.

Detektor jelek és környezeti változók

Esemény sorszáma Al							Alsó ka	lsó kamra parkettáinak jelei						
V	∆t [µs	s] <i>F</i>	Alsó ka	amra ↓	térfor	máló :	szálair	nak jel	ei	Ļ				
0	72396	65535	65535	65407	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	
65535	57855	65535	65535	65407	65535	57343	65479	65535	65535	65535	65535	65183	65535	
65535	65534	16383	65535	65535	65535	65023	65535	65523	65535	65535	65487	65535	65535	
98638	32301	25436	24409	11519	199	507	35187	27500	28500					
1	220243	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	
65535	65535	65455	65535	65407	65535	57343	65532	65535	65535	65535	48895	64763	65535	
65535	65535	65535	65523	65535	65535	65535	65535	64767	65535	65535	65535	65535	65527	
97922	32305	25436	24718	11519	199	504	35250	27500	28500					
2	32460	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535	16383	65535	
65535	65535	65535	65535	65311	65535	57343	65535	65475	65535	65535	65535	65535	63615	
65535	65535	65535	65535	65523	65535	65535	65535	65535	63487	65535	65535	65535	65407	
98065	32776	25436	24873	11519	199	504	35250	27500	28500					

8. ábra. A detektorból ki
olvasott jelek struktúrája: eseményszám, előző esemény óta eltelt idő
 μs -ban, front-end elektronikákcsatornáinak megszólalás
a tízes számrendszerben, valamint a mért környezeti változók és detektor jelek.

3.2. Esemény alapú adatfeldolgozás

A fentebb ismertetett adatstruktúrából következik, hogy az adatfeldolgozás eseményenként 4 történik, tehát az analizátor program a mérési fájlt sorról sorra (eseményenként) olvassa be és dolgozza fel. Az adatfeldolgozás folyamatát a 9. ábra mutatja.

Előanalizátor program végzi el a CCC kamrák programbeli virtuális pozícionálását és a front-end elektronikák azon csatornáinak kizárását a további analízisből amelyek térformáló szálai vagy parkettái legalább kétszer annyi részecskét detektáltak mint az átlagosan detektált részecskeszám.

Az analizátor program fő feladata, hogy kiszámolja a müonfluxust valamint "monitorozza" a környezeti változók és a detektorjelek időbeli változását. Továbbá bemenetet biztosít a Monte Carlo szimulációnak: kiszámolja a parketták és térformáló szálak hatásfokait azaz a CCC kamrák uniformitását, valamint elkészíti a zenit-szög-klaszterméret eloszlást. A Monte Carlo szimuláció feladata az adott eloszlású események (beütések) generálása a detektor vizsgálatának céljából.

 $^{^4}$ Nagyenergiás fizikában használatos az ún. az event-by-event vagy track-by-track elnevezés is.



9. ábra. Az adatfeldolgozás folyamata: előanalizátor program elvégzi a CCC kamrák pozícionálását és a rossz csatornák kizárását további analízisből. Az analizátor program dolgozza fel a mérés során a detektorral gyűjtött vagy Monte Carlo szimulációval generált adatokat.

Az előanalizátor és az analizátor programok felépítése azonos. A programok sorról sorra beolvassák mérési adatokat. Az front-end elektronikák csatornáinak jeleit átalakítják kettes számrendszerbe és az így kapott számot megfordítják. Minden elektronikán 16 csatorna van, így egy elektronikához tartozó számból 16 bit ("0" vagy "1") jön létre. Ha a front-end elektronikához tartozó parketta vagy térformáló szál eseményt detektált, akkor "1"-es számjegy tartozik az adott elektronika csatornához, ha nem detektált akkor "0". Összesen 160 bit adja meg egy CCC kamrán a részecskebeütések parketta és térformáló szál irányú vetületeit.

A részecskebeütések megkeresésére egy klaszterkereső algoritmust írtam, amely az adatfeldolgozó program része. A klaszterkereső algoritmus minden CCC kamrán megkeresi a jelet adó parketta- és térformáló szál-csoportokat. A klaszterkeresés 1 + 1 dimenzióban történik – külön-külön a parketta és térformáló szál irányokban. Az algoritmus megkeresi a klaszterközéppontokat, kiszámolja a klaszterekméreteket, továbbá megadja az adott kamrán található parketta- vagy térformáló szál-csoportok számát. A 10. ábrán látható a klaszterméretek eloszlása 2 millió kozmikus müonra, amely azt mutatja, hogy az 5×5 -nél nagyobb méretű klaszterek száma elhanyagolható (< 1%). Ezért az 5×5 -nél nagyobb méretű klasztereket zajnak tekintem a továbbiakban.

A detektorunkon keresztülhaladó kozmikus müonok pályájának megkeresésére egy kombinatorikus nyomkereső algoritmust írtam. A kombinatorikus nyomkereső algoritmus minden – különböző kamrán található – klaszterkombinációra egyenest illeszt, majd kiszámolja a klaszterközéppontok és az illesztett egyenes távolságának négyzetösszegét. Az illesztés során csak azokat a klasztereket veszi figyelembe a program, amelyek mérete 5×5 vagy annál kisebb (lásd 10. ábra). Az algoritmus csak akkor illeszt egyenest egy kamrán található klaszterre, ha ott kevesebb kevesebb mint 5 klaszter van. Ezután az illesztett egyenesek közül 1+1 dimenzióban kiválasztja a legkisebb négyzetösszeggel rendelkező egyenest. Ezek az egyenesek a mért részecskepálya parketta és térformáló szál irányú vetületei.



10. ábra. A klaszterméretek eloszlása 2 millió detektált kozmikus müonra. Az 5×5 -nél nagyobb méretű klaszterek száma elhanyagolható.

A 1. fejezetben ismertetett méréseknél kiemelt jelentősége van a – főleg elektronokat tartalmazó – részecskezáporok okozta események szűrésének. Ezt $\sim 10 - 20$ cm vastagságú vaslemezek hozzáadásával érik el. A természetes részecskezáporok esetén tipikusan több részecske halad keresztül egyszerre több detektorrétegen is. Elhanyagolható annak az esélye, hogy ezek a beütések éppen úgy haladjanak keresztül több különböző kamrán, hogy pont egy szép "nyomot" mutassanak. Esetünkben a klaszter- és részecskepályakereső algoritmusok együttes alkalmazása biztosítja a müontomográfon keresztülhaladó részecskezáporok kiszűrését, így nem szükséges a detektorunk "árnyékolásának" biztosítása súlyos vaslemezek hozzáadásával.

A részecskepályák és a kamrákon mért beütések helyének ismeretében elvégezhető a detektor kamráinak pozícionálása és az esetleges rossz front-end elektronikacsatornák eliminálása. A 11. ábrán látható a részecskepályakereső algoritmus által talált "nyom" és a hozzá tartozó klaszterközéppontok távolságának hisztogramja az egyes CCC kamrákra. Ennek hisztogramnak az átlaga adja meg a kamra pozíciójának átlagos eltérését, amely tipikusan néhány μ m. Az előanalizátor program az átlagos eltéréseket kiírja egy fájlba, amit beolvas az analizátor program és korrekcióként hozzáad a mért koordinátákhoz. Ez a korrekció elengedhetetlen a müontomográfon keresztülhaladó részecskék pályájának pontos mérése érdekében. A hisztogram a szórása (RMS) megadja a CCC kamrák ΔL helyfelbontását, amely 1,5 mm minden CCC kamrára. A ΔL helyfelbontás és a H = 224 mm detektor magasságból (az alsó és felső CCC kamrák távolsága) kiszámolható a müontomográf szögfelbontása:

$$\Delta \theta = \arctan\left(\frac{2\Delta L}{H}\right) = 13 \,\mathrm{mrad.} \tag{4}$$

A 13 mrad szögfelbontás azt jelenti, hogy detektorunk 1,6 cm \times 1,6 cm felületegységekre történő "szegmentálása" mellett, pl. 2 méter pontossággal határozhatjuk meg a felette kb. 50 méterrel elhelyezkedő földalatti üreg méretét vagy kőzet-inhomogenitás kiterjedését. A 3.3. alfejezetben látni fogjuk, hogy a mért szögfelbontás jó egyezést mutat a Monte Carlo szimulációval kapott szögfelbontással.



11. ábra. A mért klaszterközéppontok és az azokra illesztett egyenes távolságának eloszlása. Az eloszlás hisztogramjának átlaga megadja a CCC kamrák pozíciójának átlagos eltérését, szórása a helyfelbontást, amely $\Delta L = 1,5$ mm minden CCC kamrára.

Felmerül a kérdés, hogy a kamrákon mért beütések mennyiben származnak valódi részecskék okozta beütésekből. A mérések során figyelmen kívül lehet hagyni az elektromos zajból és azoktól a részecskéktől származó beütéseket, amelyek nem haladnak keresztül a müontomográf 4 CCC kamráján. A detektálási hatásfok fontos paraméter az adatgyűjtés ideje és detektor energiafelhasználása szempontjából: kisebb detektálási hatásfokkal több idő szükséges ugyanakkora statisztika gyűjtésére, ami nagyobb energiafelhasználást jelent a detektor szempontjából. Egy kamra detektálási hatásfoka megadja, hogy a detektált részecskék száma hány százaléka az adott kamrán keresztülhaladó 4 pontos részecskepályák számának:

$$\eta = \frac{N_{\rm det\,ekt\,\acute{a}lt}}{N_{\rm \ddot{o}sszes}} \quad , \tag{5}$$

ahol η jelöli a vizsgált kam
ra hatásfokát, $N_{\text{detektált}}$ a vizsgált kamrán detektált részecske
pályák számát és $N_{\text{összes}}$ a vizsgált kamrán mért összes részecske
pályák számát.

Az (5) egyenlettel definiált hatásfokot a következő eljárással határoztam meg: egyenest illesztettem 3 CCC kamrán mért klaszterközéppontokra, kihagyva az éppen vizsgált kamrát. Extrapoláltam az egyenest a vizsgált kamrára és eggyel növeltem az összes részecskepályák számát. Ezek után kiszámoltam, hogy a vizsgált kamrán talált klaszterközéppont milyen távol esett az extrapolált ponttól: ha a két pont közötti távolság három parketta szélessége (12 mm) vagy annál kisebb volt, akkor növeltem eggyel a detektált részecskepályák számát. A mért illetve az extrapolált pontok távolsághatárának 3 parketta szélességet választottam. Klaszterezésnél a 10. ábra alapján maximum 5×5 -ös méretű klasztereket választottam ki. A beütés helyét a klaszterközeppont adja meg, így egy 5×5 -ös méretű parketta vagy térformáló szál csoport közepének (a részecskebeütés mért helye) és szélének távolsága biztosan kisebb mint 3 parketta szélessége (12 mm). Végül miután ezt az eljárást alkalmaztam minden eseményre, a vizsgált kamra detektálási hatásfokát a detektált részecskepályák számának és az összes részecskepályák számának hányadosa alapján kaptam meg.

A 12. ábrán láthatók a CCC kamrák parkettáinak (*piros hisztogramok*) és térformáló szálainak (*kék hisztogramok*) detektálási hatásfoka (uniformitása). A detektálási hatásfokok 95 % felett vannak minden parkettára és térformáló szálra. Látható, hogy néhány helyen a detektálási hatásfok több 10 %-kal kisebb. Ezt a drasztikus csökkennést nem a parketták vagy térformáló szálak hibája, hanem a CCC kamrák jeleit kiolvasó front-end elektronikák csatornáinak degradációja okozza.



12. ábra. Hatásfok hisztogramok: parkettákra (piros) és térformáló szálakra (kék).

A detektor feletti anyag vastagságának vagy sűrűségének meghatározására elengedhetetlen a müonhozam ismerete. Az F müonhozam megadja a dS felületen, d Ω térszögből, dt idő alatt keresztülhaladó részecskék dN számát:

$$F = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}S\,\mathrm{d}\Omega\,\mathrm{d}t} \quad , \tag{6}$$

Esetünkben projektív geometria (1+1 dimenzió) van, így a müontomográfon keresztülhaladó részecske pályáját jellemezhetjük a parketta és térformáló szál irányú vetületek meredekségével. A d Ω térszög kifejezhető a meredekségek segítségével:

$$d\Omega = \frac{1}{(m_X^2 + m_Y^2 + 1)^{3/2}} \cdot dm_X dm_Y , \qquad (7)$$

ahol d $m_X = 1, 6/22, 4$ és d $m_Y = 1, 6/22, 4$ a detektor felületének "szegmentálásból"⁵ valamint a magasságából adódó egységnyi meredekségek. Továbbá m_X és m_Y a müonto-mográfon keresztülhaladó részecske pályájának parketta (X) és térformáló szál (Y) irányú meredeksége.

A müonhozam kiszámításának feltétele a detektor geometriájától függő akceptancia ismerete. Akceptancia a detektor érzékeny felülete egy ismert irányból érkező részecskére, amit a következő egyenlettel írhatunk fel:

$$A = \epsilon \cdot \max\left(L_X - H \cdot m_X, 0\right) \times \max\left(L_Y - H \cdot m_Y, 0\right) , \qquad (8)$$

ahol $\epsilon = 0,9$ a detektálási hatásfok korrekció, $L_X = 32$ cm és $L_Y = 32$ cm a detektor érzékeny felületének méretei a parketták és térformáló szálak irányában, H = 22,4 cm a detektor magassága. A 13. ábra bal oldali panelén látható a számolt akceptancia a detektor 1,6 cm × 1,6 cm felületű egységekre történő "szegmentálása" mellett.

A fentiek ismeretében a következő kifejezés adja meg az F müonhozamot:

$$F = \frac{1}{L_X L_Y A m_X^{max} m_Y^{max}} \cdot \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}m_X \mathrm{d}m_Y \left(\frac{\mathrm{d}m_X \mathrm{d}m_Y}{\mathrm{d}\Omega}\right)^4 \mathrm{d}t} , \qquad (9)$$

ahol $m_X^{max} = L_X/H = 32/22, 4$ és $m_Y^{max} = L_Y/H = 32/22, 4$ a parketta (X) és térformáló szál (Y) irányra vonatkozó maximális meredekségek. A 13. ábra jobb oldali panelén látható az MTA Wigner FK gázdetektor-laboratóriumában mért müonhozam. A 18,5 órás adatgyűjtés során detektorunkon ~ 280000 részecske haladt keresztül. A mérésből meghatározott függőlegges müonhozam ~ 80 /m²/sr/s.

 $^{^5}$ Esetünkben szoftveresen történik a detektor érzékeny felületének "szegmentálása": földalatti méréseknél tipikusan 1,6 cm \times 1,6 cm felületű egységekre osztottam fel a detektor felületét, ezzel biztosítva a kellő nagyságú statisztikát minden felületegységen.



13. ábra. A müontomográf akceptanicája (*bal oldali panel*) 1,6 cm \times 1,6 cm nagyságú felületegységek esetén és az MTA Wigner FK gázdetektor-laboratóriumában mért müonhozam (*jobb oldali panel*).

3.3. A müontomográf vizsgálata Monte Carlo szimulációval

A 3.2. alfejezetben meghatároztam a fő detektorparamétereket: a detektálási hatásfokot és szögfelbontást. Jelen alfejezetben bemutatom a detektorparaméterek vizsgálatára készített, esemény alapú Monte Carlo szimulációt.

A részecskepályák pontos szimulációjára léteznek a szakirodalomban általánosan használt Monte Carlo generátorok, mint pl. a CORSIKA (COsmic Ray SImulations for KAscade) [21]. Esetünkben azonban nincs szükség a részecskezáporok fejlődésének leírására, csak a földfelszíni eloszlásra, ezért egy egyszerű, saját generátort készítettem. A földfelszíni eloszlás cos² jellegű (lásd az A. függelékben), ezért ezt az eloszlást építettem be a Monte Carlo szimulációba, amely megadja a részecskepálya-meredekségeket és kamrákon történő "áthaladás" esetén a beütések helyét.

A generált részecskepályák esetében meg kell vizsgálnunk, hogy eleget tesznek-e a 2.4. fejezetben ismertetett (1) triggerfeltételnek. Ehhez először a kamrák pozícionálására van szükség, majd megvizsgálom, hogy a generált részecskepálya mely CCC kamrákon halad keresztül. Ezt a következő módon határozom meg: akkor "ment át" egy részecske egy vizsgált CCC kamrán, ha a kamrára extrapolált ponthoz tartozó ϵ_g generált detektálási hatásfok nagyobb mint a $100\% - \epsilon_m$, ahol ϵ_m a mérési adatokból beolvasott hatásfok (lásd 14. ábra bal oldali panelén).

A következő lépés a klaszterek generálása a CCC kamrák felületére. A 14. ábra jobb oldali panelén látható meredekség-klaszterméret eloszlás felhasználásával generálok klaszterméretet a kamrákra extrapolált pontok köré. A 14. ábra jobb oldali panel 2 dimenziós hisztogramjából kiszámoltam a meredekségekhez tartozó eloszlásfüggvényt. Generáltam egy valószínűséget, majd az adott meredekséghez akkora klaszterméretet generáltam, amely valószínűsége még kisebb mint a generált valószínűség.



14. ábra. A mérési adatok feldogozásából kapott detektálási hatásfok "térkép" (*bal oldali panel*) és meredekség-klaszterméret eloszlás (*jobb oldali panel*).

A részecskepályákat és azokhoz tartozó klasztereket a program egy a 3.1. fejezetben ismertetett szerkezetű fájlba írja ki. Ezt a fájlt beolvashatom az adafeldolgozó programba (lásd 9. ábra), amely lehetőséget biztosít a mérések és szimulációval generált adatok összehasonlítására.

Az adatfeldolgozó programmal a mérési eredményekhez hasonlóan a Monte Carlo szimulációval generált adatok is elemezhetők. Elsőként a Monte Carlo szimulációval generált részecskepálya-meredekséget és a részecskepályákra generált klaszterekre illesztett egyenes meredekségét hasonlítottam össze az analizátor program segítségével. A 15. ábrán látható a Monte Carlo szimulációval generált részecskepálya-meredekség ("valódi" meredekség) és az adatfeldolgozó program által meghatározott részecskepálya-meredekség ("mért" meredekség) különbségének eloszlása 340 000 generált eseményre. Ennek az eloszlásnak a szórása (RMS) adja meg a müontomográf szögfelbontását, amely 11 mrad mindkét dimenzióban. Ez a – Monte Carlo szimulációval generált "részecskékre" meghatározott – szögfelbontás jó egyezést mutat a 3.2. alfejezetben közölt eredménnyel.



15. ábra. A "valódi" részecskepálya-meredekség és a "mért" részecskepálya-meredekség különbségének eloszlása az illesztett Gauss eloszlásokkal a parkettákra (*bal oldali panel*) és a térformáló szálakra (*jobb oldali panel*). Az eloszlások hisztogramjainak szórása (σ , RMS) adja meg a szögfelbontást. Ez 11 mrad-nak adódott, amely jó egyezést mutat a korábban számoltakkal (lásd a 3.2. fejezetben).

A Monte Carlo szimuláció előnye a mérésekkel szemben, hogy lehetőség van bizonyos paraméterek be- vagy kikapcsolására. Érdekes kérdés pl., hogy szükséges-e a detektálási hatásfok korrekció. Ennek vizsgálatára kiváló eszköz a Monte Carlo szimuláció.

A kérdés vizsgálatára 1-1 millió eseményt generáltam a detektálási hatásfok korrekcióval és korrekció nélkül. A 16. ábrán látható a hatásfok korrekcióval generált müonhozam és korrekció nélkül generált müonhozam különbségének valamint statisztikus hibáknak a hányadosa σ egységekben. A fekete kontúrvonalak mutatják a statisztikus hibákat. A szürkeárnyalatos skála alapján jól látszik, hogy a hányados ± 1 σ értéken belül van. Ez arra enged következtetni, hogy nem szükséges a detektálási hatásfokkal korrigálni a mért müonhozamokat.



16. ábra. A hatásfok korrekcióval és korrekció nélkül generált müonhozamok különbségének valamint a statisztikus hibának a hányados
a σ egységekben. A hányados \pm 1 σ értékek között van, az
az nem szükséges detektálási hatásfok korrekció.

4. Detektor tesztek

Jelen fejezetben bemutatom a tesztméréseket és azok legfontosabb eredményeit. A mérések helyét *fehér csillagokkal* jelöltem a 17. ábrán. Az elvégzett mérések és azok főbb jellemzői az 1. táblázatban láthatók. A mérések kiértékelését az előző fejezetben ismertetett program segítségével végeztem el.



17. ábra. A detektorral végzett mérések helyei.

Mérés helye	Mélység	Időtartam	Mért müonszám
	[m]	[nap]	$[\times 10^{6}]$
Laboratórium	2	> 100	> 100
Jánossy-akna	13, 5, 35	15	2
Kőbányai alagútrendszer	20	40	1,5
Molnár János-barlang	50	77	0,5
Ajándék-barlang	60	50	$0,\!17$
Pilis hegytető	0, 2, 5	0,5	0,3

1. táblázat. A müontomográf tesztek főbb paraméterei.

4.1. Ólomtorony leképezése kozmikus müonokkal

Az első detektor teszteket a MTA Wigner FK RMI gázdetektor laboratóriumában végeztem el. A mérések célja az volt, hogy megvizsgáljam a müontomográf érzékenységét valamint megmutassam detektorunk alkalmas pl. nagysűrűségű tárgyak müon leképezésére.

Építettem egy 20 cm \times 20 cm \times 50 cm méretű, 150 kg tömegű tornyot ólomtömbök felhasználásával a müontomográf felett 40 cm-re kb. 30° zenit- és 45° azimut-szögben. Ezt követően két mérést készítettem elő ugyanabban a detektor pozícióban. Az első mérést az ólomtoronnyal végeztem el, a müontomográfon 3 millió kozmikus részecske haladt keresztül 107 óra alatt. A második mérés során nem volt a detektor látószögében az ólomtorony, ekkor detektorunk 4,5 millió kozmikus részecskét mért 139 óra alatt.



18. ábra. Az ólomtorony leképezései: a két mérésből számolt felület egységenkénti relatív müonhozam statisztikus hibákkal (lásd a bal oldali panelen) és a σ egységekben megadott "intenzitás" (lásd a jobb oldali panelen). Az ólomtorony a megfelelő térszögben ~ 15%-os müonhozam csökkenést okozott.

A kiértékelés során a detektor felületét 0,8 cm × 0,8 cm nagyságú területegységekre osztottam és összegeztem az egyes területegységeken keresztülhaladó müonokat ólomtornyos és ólomtorony nélküli esetekben. A 18. ábrán láthatók az ólomtorony leképezései: a bal oldali ábrán a mérések idejével normált részecskeszámok aránya és az idővel normált részecskeszámok aránya nak statisztikus hibája, a jobb oldali ábrán a részecskehozamok különbsége osztva a területegységenkénti statisztikus hibákkal σ egységben. A részecskeszámok statisztikus hibája Poisson-eloszlást követ, tehát a statisztikus hiba a részecskeszám négyzetgyökével arányos. Két Poisson-eloszlású valószínűségi változó arányának hibáját a következő kifejezés adja meg:

$$\delta\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = \frac{N_1}{N_2} \sqrt{\left[\frac{\delta N_1}{N_1}\right]^2 + \left[\frac{\delta N_2}{N_2}\right]^2} = \frac{N_1}{N_2} \sqrt{\left[\frac{1}{N_1}\right]^2 + \left[\frac{1}{N_2}\right]^2} , \qquad (10)$$

ahol N_1 és N_2 Poisson-eloszlású valószínűségi változók. A (10) egyenletet felhasználva azt kaptam, hogy az ólomtorony $15\% \pm 5\%$ -os hozam csökkenést okozott a megfelelő térszögben. A Bethe-Bloch formula alkalmazásával kiszámolható, hogy mekkora az a határenergia, amelynél kisebb energiájú müonok nem juthatnak át adott vastagságú anyagrétegen [20]. Ez 50 cm vastagságú ólomréteg esetén ~ 1 GeV energia leadást jelent. Méréseink egyértelműen azt bizonyítják, hogy detektorunk alkalmas különböző objektumok müon leképezésére laboratóriumi körülmények között.

4.2. Müonhozam-mérések a Jánossy-aknában

Jelen alfejezetben bemutatom a kozmikus müonok hozamának különböző mélységeken történő meghatározására irányuló méréseket, amelyeket az MTA KFKI telephelyén található Jánossy-aknában (lásd 19. ábra) végeztünk el.



19. ábra. A Jánossy-akna Nyugat-Kelet irányú metszete.

Jánossy Lajos a XX. század egyik legkiemelkedőbb magyar fizikusa volt. Elsők között ismerte fel a kozmikus zápor jelenségét 1938-ban. Később rész vett a KFKI megalapításában és az ott elinduló kutatások irányításában [22]. 1951 nyarán az ő kérésére készült el a kiterjedt légizáporok tanulmányozására szolgáló 32 méter mély akna. Az aknában felülről számíva 10 méterenként, sugarasan szétfutó, összesen 6 darab táró található. Az aknát a Nemzetközi Geofizikai Évére (1957-1958) tervezték és 1958. február 20-án adták át az aknában a kozmikus sugárzás μ mezon⁶ komponensének vizsgálatára szolgáló "földalatti" obszervatóriumot, amely detektor egy Geiger-Müller csövekből felépülő teleszkóp volt [23]. Az obszervatórium legkiemelkedőbb eredménye a Forbush-effektus⁷ észlelése volt nagy energiatartományban (> 10 GeV) is. A berendezés egészen 1986-ig üzemelt az aknában.

20 év után újra mérések végzésére alkalmas hellyé alakítottuk a Jánossy-akna táróit⁸. Célunk a kozmikus müonok hozamának mérése volt különböző mélységeken detektorunk segítségével. A müonhozam ismerete különböző mélységeken több lehetőséget is biztosít számunkra. Egyrészt könnyen becsléseket tehetünk más mélységeken és más anyagi környezetben (pl. barlangban) végzett földalatti mérések minimális idejére a detektorunk odahelyezése előtt. Másrészt, a mért fluxus és a detektor feletti anyag sűrűségének ismeretében meghatározhatjuk, hogy adott irányból mekkora utat tettek meg a detektor feletti anyagban a kozmikus müonok amíg eljutottak a müontomográfig. Ez utóbbi lehetőség használható a detektor feletti domborzat rekonstrukciójára (lásd 4.3. alfejezet).



20. ábra. Müonfluxus 13,5 (bal oldali panel) és 35 (jobb oldali panel) f.e.m. mélységeken.

⁶Abban az időben még mezonnak gondolták a μ^- -t, de aztán kiderült, hogy az e⁻ testvére és lepton. ⁷A kozmikus sugárzás intenzitásának a bolygóközi térben terjedő lökéshullámok által kiváltott hirtelen

lecsökkenése.

 $^{^8\}mathrm{Az}$ utolsó kísérletek 1990-ben voltak: Horváth Dezső és kollégái mérésekkel cáfolták a hidegfúziót.

A Jánossy-akna két tárójában végeztünk méréseket: 8 napot mértünk a 13,5 földekvivalens méter mélységen található, D-É irányú táróban, ezalatt ~ 600 000 kozmikus müont detektáltunk. További 7 napos mérést is végeztünk a 35 földekvivalens méter mélyen található, D-É irányú táróban, ahol ~ 50 000 kozmikus müon haladt keresztül a müontomográfon. A 20. ábra mutatja a Jánossy-akna 10 méteres (*bal oldali panel*) és 30 méteres táróiban (*jobb oldali panel*) mért müonfluxust.

A 0°-ban mért müonfluxust összehasonlítottam a [24] cikk eredményével (lásd 21. ábra). A piros pontok hibákkal mutatják a mért müonhozamokat azok statisztikus hibáival, valamint a kék görbe mutatja a [24] irodalomban számolt függőleges müonhozamot. A mért mélységeket és az irodalomban használt mélységeket is átszámoltam földekvivalens mélységekre. Látható, hogy a mérési pontok hasonló trendet mutatnak a számolások eredményével. Ebből arra következtethetünk, hogy a müontomográf különböző mélységeken is megfelelően méri a müonhozamot. Ezek a statisztikák elegendőnek bizonyultak a müontomográf működésének demonstrálására, azonban a detektor megfelelő kalibrálása és a tárók okozta effektus pontosabb (5 – 10 %) kimutatása további méréseket igényel. Becslésünk szerint ehhez minden táróban egyenként ~ 1 hónapos mérés szükséges.



21. ábra. A 0°-ban mért müonhozamok mélységfüggése: a méréseket laboratóriumban, a Jánossy-akna 10 méter mély, D-É irányú valamint a Jánossy-akna 30 méter mély, D-É irányú táróiban végeztük el. A mért értékek (*piros pontok hibákkal*) és a [24] irodalmi adatok (*kék vonal*) összehasonlítása egyezést mutat.

4.3. Molnár János-barlang feletti domborzat rekonstrukciója

A Molnár János-barlang a József-hegy keleti oldalában található. Felső ága a Frankel Leó utcában található Malom-tó felett 12 méterrel helyezkedik el. A barlang – eddig ismert közel 7 km-es hosszának – több mint 95 %-a víz alatt van. A barlang vize látja el termálvízzel a Lukács fürdőt. Azonban legnagyobb levegős kamrájához egy mesterségesen kialakított táró is vezet [25]. A müontomográffal e táróban végeztünk 3×3 hetes méréseket (lásd 22. ábra).



22. ábra. A József-hegy szintvonalas térképe Egységes Országos Vetületi rendszerben, ahol csillag jelöli a detektor helyét a Molnár János-barlang tárójában. Továbbá a Molnár János-barlang Ny-K irányú metszete [25], ahol a piros háromszög mutatja a detektor helyét és látószögét.

A táró feletti rész már részletesen meg lett vizsgálva: geoelektromos és szeizmikus mérésekkel korábban meghatározták, hogy nincsen rejtett üreg a táró felett. Mérésünk célja a táró feletti domborzat rekonstrukciója volt. A domborzat rekonstrukciót egy egyszerű modell alapján készítettem el: a detektorunk feletti kőzet sűrűsége nem volt ismert, így azt homogén, $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$ sűrűségűnek feltételeztem a rekostrukció során. Továbbá feltettem, hogy a müonhozam exponenciálisan csökken kis mélységeken (0-50 méter) [20, 26].

Az adatok kiértékelése során a detektor felületét 1,6 cm × 1,6 cm felületegységekre osztottam fel. Ebben az esetben detektorunk szögfelbontása $\Delta \theta = 80$ mrad, ami azt jelenti, hogy 40 méter mélyről ± 3,2 méter pontossággal (± 8%) adhatjuk meg detektorunk feletti anyag vasagságát. A mért müonhozamból területegységenként kiszámoltam a müontomográf feletti anyagréteg vastagságát a [20, 26] irodalmakban közölt mélység-müonhozam görbe alapján (lásd 23. ábra).



23. ábra. A Molnár János-barlang feletti domborzat rekonstrukciója kozmikus müonokkal. Detektorunk az ábra (0 m, 0m, 0m) Descartes-koordinátákkal megadott pontjában volt elhelyezve. Az *Észak-Dél* és *Nyugat-Kelet* irányú tengelyek a detektor síkjában mért vízszintes távolságokat jelölik méterben. A függőleges tengely és a színskála a detektor feletti anyagréteg vastagságát mutatja földekvivalens méterben.

A detektor feletti anyagréteg pontosabb (< 5 %) meghatározásához a hosszabb idejű (~ 2 hónap) mérés mellett szükség lenne a modell finomításához is: pl. figyelembe kellene venni, hogy a kozmikus műonok zenit-szögének eloszlása változik a mélység növekedésével [27]. Ennek ellenére, ez az eredmény (lásd 23. ábra) jól demonstrálja detektorunk geofizikai alkalmazhatóságát.

5. Rejtett üregek keresése az Ajándék-barlangban

Kutatómunkánk célja nagyléptékű kőzet ill. talaj szerkezetvizsgálat, alapvetőleg 5-10 m átmérőjű, rejtett járatok vagy üregek keresése a földfelszín közeli kőzet- és talajrétegekben. Az előző fejezetben leírt detektortesztek és az eszköz működésének megismerése után megkezdhettük méréseinket a Pilisben található, részben feltérképezett Ariadne-barlangrendszerben. Ez 13,1 km hosszával és 203 méteres mélységével jelenleg Magyarország harmadik leghosszabb és harmadik legmélyebb barlangrendszere. Jelen fejezetben bemutatom az Ariadne-barlangrendszer Ajándék-barlangjában végzett méréseinket, továbbá közlöm az eredményeket és következtetéseket.

5.1. Az Ajándék-barlang feltérképezése és a detektor elhelyezése



24. ábra. Az Ajándék-barlang térképe: felülnézetből (*jobb oldali panel*) és Ny-K irányú metszetben (*bal oldali panel*). A színezés a járatok mélységét jelöli (pirostól a kék felé mélyül).

A 24. ábrán látható a barlang térképe felülnézetből (*bal oldali panel*) és a barlang Ny-K irányú metszete (*jobb oldali panel*). A barlang feltérképezését dr. Surányi Gergely geofizikus, barlangász végezte el: barlang feletti felszínt 3-5 cm pontosságú TOPCON GPS segítségével térképezte fel, majd a barlang belsejében háromszögeléssel meghatározta a detektor helyét (lásd 24. ábra) és detekor helyéül szolgáló üreg méretét. Ezek ismeretében kiszámolta a detektor feletti kőzetréteg vastagságát.

A detektort 2011. november 2-án helyeztük el az Ajándék-barlangban kb. 70 méterre a barlang bejáratától. A detektor felett, függőleges irányban a kőzet vastagsága ~ 60 méter volt. Méréseinket motiválta, hogy korábbi geoelektromos mérések egy sűrűség anomáliát mutattak ki itt, azonban a rendelkezésre álló adatok birtokában ill. jelen analízisekkel sem dönthető el, hogy a mérési pont felett egy 5-10 méter átmérőjű üreg vagy egy szálkő van. A méréseket e kérdés eldöntése céljából végeztük.

A detektor működését biztosító gázpalackot és három darab 50 Ah teljesítményű akkumulátort a barlang bejáratánál helyeztük el (lásd 25. ábra). A barlang bejáratától egy ~ 100 m hosszúságú gázcsővel ill. kábellel szállítottuk az Ar-CO₂ gázkeveréket kamráknak és az elektromos áramot az adatgyűjtő egységnek. A mérési pont megközelítése nagyon nehéz volt, a detektort kézről-kézre adtuk egymásnak (lásd 26. ábra). A 70 méter megtételéhez közel fél órára volt szükségünk.



25. ábra. Egy gázpalackot és 3 a darab 50 Ah teljesítményű akkumulátor az Ajándékbarlang bejáratánál helyeztük el. A detektor működéséhez szükséges gázkeveréket és elektromos áramot ~ 100 méter hosszúságú gázcsővel és kábelen juttattuk a barlang bejáratától mintegy 70 méterre elhelyezkedő müontomográfhoz.



26. ábra. A müontomográf elhelyezése az Ajándék-barlangban.

5.2. Környezeti változók hatása és a müontomográf stabilitása

laboratóriumi körülmények között a környezeti változók (H, T, p) stabilak. Ellenben geofizikai alkalmazások során a gáztöltésű detektorok működése megköveteli a környezeti változók folyamatos monitorozását a geofizikai alkalmazások során. Így biztosíthatjuk a biztonságos, hosszú távú mérést és megvizsgálhatjuk a környezeti változók hatását a detektor működésére. Továbbá segíthet a későbbi analízis korrekciók megtételében is.

A detektor adatgyűjtő rendszere a működés során folyamatosan méri a környezeti paramétereket. Egy-egy páratartalom- és hőmérséklet-szenzor található az adatgyűjtő rendszeren (H_a, T_a) , a plexidoboz belsejében (H_b, T_b) ill. a plexidobozon kívül. Az adatgyűjtő rendszeren egy légnyomást mérő szenzor is elhelyezésre került. A 27. ábrán láthatók a környezeti változók időfüggése a mérés 50 napos időtartama során. A külső hőmérséklet és páratartalom végig állandó volt a barlang belsejében $(H_k, T_k)^9$.

A detektor szempontjából a legfontosabb környezeti változó a belső páratartalom, amely nagyon lassú növekedést mutatott ~ 5 hétig, majd stabilizálódni látszott. Az adatgyűjtő rendszeren mért páratartalom állandó volt a mérés során ($25\% \pm 3\%$). A 27. ábra 3. panelján láthatók a mért hőmérséklet grafikonok ± 1 °C-os hibával: ~ 23 °C az adatgyűjtő egységen, ~ 13 °C a plexidoboz belsejében és ~ 11 °C a barlangban.

 $^{^9 {\}rm Megj.:}$ a külső hőmérséklet $\sim 20^o$ -ot csökkent november 1. és december 22. között!

A detektor karbantartását és a környezeti változók ellenőrzését heti rendszerességgel végeztük el. A 27. ábra legalsó paneljén látható ugrások mutatják az akkumulátor cseréket, ekkor a mérés megszakadt. A gázpalack cseréket "G" jelöli.



27. ábra. A környezeti változók és az akkumulátorok feszültségének változása az 50 napos adatfelvétel során. "B" betű jelöli az akkumulátor cseréket és "G" betű mutatja a gázpalack cserék időpontját.

Laboratóriumi tesztek alapján úgy ítéltük meg, hogy elegendő óránként ~ 1 liter gázt átáramoltatni a CCC kamrákon a detektor megfelelő működéséhez [15, 20]. Az Ajándékbarlangban 4 liter/óráról 2,5 liter/órára csökkentve a gázáramlást a triggerelt események száma növekedést mutatott (lásd 28. ábra), azonban az azonosított részecskepályák frekvenciája nem csökkent. A zajos tartományban a triggerhatásfok ~ 25%-os csökkenést mutatott, amit figyelembe kellett vennem a mérési adatok analízisében. Miután a gázáramlást 3 liter/órára állítottuk a triggerelt események frekvenciája csökkent, majd beállt 0,25 Hz körüli értékre. A megfigyelt zaj nem mutatott korrelációt más környezeti változókkal, tehát csak a CCC kamrák gáztartalmának csökkenésével hozható kapcsolatba. A zaj oka a gázcsőbe ill. a CCC kamrákba diffundáló pára és ezáltal a CCC kamrák erősítésének csökkenése volt. A folyamat időtartama több nap volt, így további tanulmányozásával az időveszteség elkerülése érdekében nem foglalkoztunk.



28. ábra. A kozmikus müonok frekvenciája az Ajándék-barlangban: a triggerelt események frekvenciája 25-tel osztva (*kék vonal*) és az azonosított részecskepályák frekvenciája (*piros vonal*).

5.3. Müonhozam-mérések az Ajándék-barlangban

Az 50 napos (1190,8 óra) mérés során a 60 méter mélyen elhelyezett detektoron 170000 kozmikus müon haladt keresztül, ez óránként 143 eseményt jelent (0,04 Hz). A 28. ábrán láthatók a mért részecskehozamok: a bal felső panel mutatja az első 31,7 nap (762,8 óra) alatt mért fluxus, a jobb felső panel pedig következő 17,8 napot (427,8 óra). E második esetben a detektort azonos helyen +90°-kal elforgattuk. A két detektorpozícióban mért fluxus ugyanolyan eloszlást mutat: a részecskehozam Ny-i irányba tolódik el az É-D szimmetriatengelyhez képest, tehát Ny felé kevesebb kőzet- és talajréteg található a detektor felett.

A 29. ábra bal alsó panelén látható mérés teljes időtartamára vonatkozó fluxus, a kontúrvonalak 1,6 cm × 1,6 cm területegységekre eső statisztikus hibát mutatják. A jobb alsó panel a két detektorpozícióban mért részecskehozamok különbségének és a területegységenkénti statisztikus hibáknak a hányadosát mutatja σ egységekben. Ez minden szögtartományban ±1 σ között van – ahogy ennek kompatibilis méréseknél várjuk. Eszerint a detektor detektálási hatásfoka nem mutatott szisztematikus romlást a mérések során.



29. ábra. A mért részecskehozamok az első detektorpozícióban (bal felső panel), a második detektorpozícióban (jobb felső panel) és a teljes mérés során (bal alsó panel). Továbbá a két detektorpozícióban mért részecskehozamok különbségének és a területegységenkénti statisztikus hibáknak a hányadosa σ egységekben (jobb alsó panel).

Az állítás bizonyítására elkészítettem a számolt " σ "-k gyakoriságát (lásd 30. ábra). A piros pontok statisztikus hibákkal mutatják a " σ "-k gyakoriságát, a kék szaggatott vonal az illesztett Gauss-görbét jelöli. Az illesztett Gauss-görbe paraméterei a következők: $\mu = -0,007 \pm 0,001$ az átlaga és $\sigma = 0,777 \pm 0,002$ a szórása.

Ez alapján látható, hogy a két detektorpozícióban mért részecskehozamok különbségének és a területegységenkénti statisztikus hibáknak a hányadosa valóban $\pm 1 \sigma$ értékek között van.



30. ábra. A két detektorpozícióban mért müonhozamokra számolt " σ "-k gyakorisága. A piros pontok statisztikus hibákkal mutatják a " σ "-k gyakoriságát, a kék szaggatott vonal az illesztett Gauss-görbét jelöli. Az eloszlás egyértelműen igazolja, hogy a két detektorpozícióban mért részecskehozamok különbségének és a területegységenkénti statisztikus hibáknak a hányadosa $\pm 1 \sigma$ értékek között van.

A detektor feletti kőzet vastagságát Surányi Gergely mérései alapján kaptuk meg: GPS-szel feltérképezte a felszínt, majd megmérte a barlangon belüli teret egy lézeres távolságmérő műszerrel. A mérések eredményéül kapott adatpont-halmazokra illesztett egy-egy felületet, majd a detektor helyének ismeretében kiszámolta, hogy az adott zenit-azimut irányokban mi ezeknek a felületeknek a távolsága. Ezután ismét illesztett az adatokra egy-egy felületet a detektor polárkoordináta-rendszerében. A két felület különbsége adta meg a detektor feletti kőzetréteg vastagságát.

A 31. ábra mutatja a szögeloszlás és a detektor feletti kőzet vastagság összehasonlítását. A piros kontúrvonalak mutatják detektor feletti kőzet vastaságát a megfelelő irányban. A legrövidebb távolság a felszíntől ~ 60 méter $0^{\circ} \pm 15^{\circ}$ irányban Észak felé és $25^{\circ} \pm 5^{\circ}$ irányban Nyugat felé. A szürkeskálás kontúrvonalak mutatják a müonhozamot (részecskeszámot). A müonhozam és topológiai mérések eredményei korrelációt mutatnak egymással, amely azt a következtetést vonja maga után, hogy nincsen egyértelműen azonosítható földalatti struktúra a müontomográf látószögében.



31. ábra. A mért kőzetvastagság (*piros kontúrvonalak*) és a mért müonhozam (*szürkeskálás kontúrvonalak*) korrelációja nem mutat rejtett barlangi üreget a detektor látószögében.

Konklúziók és összefoglalás

Szakdolgozatom elkészítése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó REGARD csoport munkájába. Diplomamunkám során részt vettem egy hordozható müondetektor kifejlesztésében, amely segítségével mérhető a kozmikus müonok zenit-szög eloszlása és megadható a fluxusa. Detektorunkat földfelszín alatt elhelyezve, több pontból történő méréssel és a domborzati viszonyok ismeretében következtethetünk a detektor feletti anyag eloszlására, azaz kimutathatjuk ha kiterjedtebb kőzet-inhomogenitás vagy rejtett földalatti üreg található detektorunk felett.

Diplomamunkám során részt vettem a közelkatódos kamrák és a müontomográf megépítésében, a detektorjeleket kiolvasó elektronikák elkészítésében, valamint a mérésekben.

A müontomográfot barlangi mérésekre optimalizáltuk: hordozható (tömege ~ 13 kg, méretei 32 cm × 46 cm × 51 cm), alacsony energiafelhasználású (< 5 W) és integrált adatgyüjtő rendszerrel rendelkezik. A detektort MTA Wigner FK RMI gázdetektor-laboratóriumában, a KFKI Kampusz területén található Jánossy-aknában és a budapesti Molnár Jánosbarlangban történő mérésekkel kalibráltam, alkalmazási lehetőségeit és korlátait feltártam, valamint igazoltam geofizikai alkalmazhatóságát. A mérések kiértékelését, a detektor vizsgálatát önállóan írt adatfeldolgozó programmal és Monte Carlo szimulációval valósítottam meg.

További méréseket végeztünk a Pilisben található Ariadne-barlangrendszer Ajándék-barlangjában. Méréseink célja egy 5-10 méter átmérőjű rejtett üreg kimutatása volt. Detektorunk 50 napot mért folyamatosan mintegy 60 méteres mélységben. Összehasonlítottuk a mért müonhozamot és topológiai mérésekből számolt kőzetvastagságot: erős korreláció mutatkozott a mért müonhozam és kőzetvastagság között. Ez arra enged következtetni, hogy nem volt rejtett barlangi üreg detektorunk látószögében. Diplomamunkám legfontosabb eredményeiből a következő publikációkat készítettük:

- (i) Barnaföldi G. G., Bencédi Gy., Hamar G., Melegh H. G., Oláh L., Surányi G., Varga D.: Kincskeresés kozmikus müonokkal– avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban Fizikai Szemle 2011/12
- (ii) G. G. Barnaföldi, G. Hamar, G. H. Melegh, L. Oláh, G. Surányi, D. Varga: Portable Cosmic Muon Telescope for Environmental Applications Beküldve NIM A (2012. 03.)

Kitekintés

Jelen dolgozatban bemutatott eredményeimet a 2012. április 17. és 20. között, a franciaországi Clermont Ferrandban megtartott "International Workshop on Muon and Neutrino Radiography 2012" ismertettem. Ezen előadásom hamarosan a konferencia kiadványában kerül publikálásra.

A CCC technológia eredetileg a CERN¹⁰ LHC¹¹ ALICE¹² kísérletének nagyon nagy impulzusú részecskék (5 – 25 GeV/c) azonosítására szolgáló detektor (VHMPID, Very High Momentum Particle Identification Detector) trigger rendszerének (HPTD, High-P_T Trigger Detector) lett kifejlesztve [14, 28]. Diplomamunkám során elkészített CCC kamrák és az alapkutatás céljából fejlesztett kamrák hasonlóságából következik, hogy a szakdolgozatomban bemutatott adatfeldolgozó programok és Monte Carlo szimulációk kisebb módosításokkal alkalmasak lehetnek a HPTD detektor adatainak analízisére ill. a detektor vizsgálatára. A VHMPID detektor építése még nem kezdődött el. Jelenleg a Letter of Intent egy újabb változatán dolgozik a csoport. Bízom benne, hogy a későbbiekben a Magyar ALICE csoport tagjaként lehetőségem lesz bekapcsolódni a detektor építésé be valamint az adatok analízisébe is, mint PhD hallgató.

Szakdolgozatomban bemutattam a 1. fejezetben ismertetett alkalmazásokhoz hasonló céllal, de új technológiával készült müonteleszkóp felépítését, kalibrálását és geofizikai alkalmazását. Kutatómunkánk távolabbi célja detektortunkat vulkánok tevékenységének vizsgálatára és nemzetvédelmi feladatokra is alkalmazni. Jelenleg is folyó méréseink eredményéiből hamarosan újabb publikációt tervezünk.

¹⁰Európai Részecskefizikai Kutatóközpont a svájci Genfben.

¹¹Large Hadron Collider, azaz a Nagy Hadronütköztető.

¹²A Large Ion Collider Experiment, azaz A Nagy Ionütköztető Kísérlet.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok témavezetőimnek Barnaföldi Gergely Gábornak és Varga Dezsőnek a kiváló szakmai háttér biztosításáért és családomnak töretlen támogatásukért. Köszönetet mondok Bencédi Gyulának, Melegh Hunor Gergelynek, Surányi "viharlámpás" Gergelynek és a REGARD csoport minden tagjának a mérések során nyújtott segítségükért. Továbbá köszönetet mondok Horváth Dezsőnek dolgozatom elolvasásáért és a hasznos megjegyzésekért. Külön szeretném megköszönni Hamar Gergőnek az elmúlt 2 évben nyújtott segítségét.

Kutatásunkat az OTKA KTIA CK 77719, OTKA KTIA CK 77815 és az OTKA NK77816, OTKA PD-73596 pályázatok támogatták.

Hivatkozások

- V. Hess: Penetration Radiation in Seven Free Ballon Flights PZ, 13, (1912)
- [2] E. P. George: Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel Commonwealth Engineer, (1955)
- [3] L. W. Alvarez, et al.: Search for Hidden Chambers in the Pyramids Science, 167, 832-839. (1970)
- [4] R. Alfaro, V. Grabski et al: A muon detector to be installed at the Pyramid of the Sun Revista Mexicana de Fisica 49, Suplemento 4, 54–59. (2003)
- R. Alfaro, V. Grabski et al: Searching for possible hidden chambers in the Pyramid of Sun Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference 5, 1265-1268. (2008)
- [6] G. Macedonio and M. Martini: Motivations for muon radiography of active volcanoes Earth Planets Space, 61, 1-5. (2009)
- K. Nagamine et al.: Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction NIM A 356, 585-595. (1995)
- [8] H. Tanaka et al.: Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmicray muons to probe the internal structure of a volcano NIM A 507, 657–669. (2003)

[9] H. Tanaka et al.:

High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan Earth and Planetary Science Letters 263, 104-113. (2007)

[10] H. Tanaka et al.:

Development of a portable assembly-type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma Earth Planets Space, 62, 119–129. (2010)

- K. Borozdin et al.: Radiographic Imaging with Cosmic Ray Muons Nature 422, 277 (2003)
- [12] G. Charpak:
 Evolution of the Automatic Spark Chambers
 Annual Review of Nuclear Science, 20, 195-254. (1970)
- [13] F. Sauli:

Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers Lectures given in the Academic Training Programme of CERN 1975-1976 (1977)

[14] G. Hamar, G. Kiss, D. Varga:

Asymmetric Multi Wire Proportional Chamber With Reduced Mechanical Tolerances NIM A 648, 163–167. (2011)

[15] Oláh L.:

Földalatti üregek vizsgálata kozmikus részecskék segítségével BSc Szakdolgozat, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2010)

[16] W. Shockley:

Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge J. Appl. Phys. 9, 635 (1938)

[17] Kiss G.:

Sokszálas proporcionális kamrák fejlesztése részecskefizikai detektorokhoz BSc Szakdolgozat, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2010)

[18] Melegh H. G.:

Müontomográf adatgyűjtő berendezésének fejlesztése Önálló laboratórium 1-2. dolgozat, BME Irányítástechnika és Informatika Tanszék (2011)

 [19] American High Voltage (AHV): TC Series High Voltage PowerSupply datasheet http://www.ahv.com (2012)

[20] Oláh L.:

Földalatti üregek vizsgálata kozmikus részecskék segítségével OTDK dolgozat, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2011)

[21] D. Heck:

The CURVED Version of the Air Shower Simulation Program CORSIKA Wissenschaftliche Berichte FZKA 6954 (2004)

[22] Király P.: Jánossy Lajos, a fizikus Fizikai Szemle 2005/8

[23] Király P.:

Kozmikus sugárzás vizsgálata 40 méter vízekvivalens mélységben Szakdolgozat ELTE TTK (1963)

- [24] L.N.Bogdanova, M.G.Gavrilov, V.N.Kornoukhov, A.S.Starostin: Cosmic muon flux at shallow depths underground Institute for Theoretical and Experimental Physics
- [25] Surányi G., Dombrádi E., Leél-Össy Sz.: Contributions of geophysical techniques to the exploration of the Molnár János Cave Acta Carsologica 39/3 565. (2010)

[26] Oláh L. és mtai.: Kincskeresés kozmikus müonokkal – avagy kozmikus müondetektálás az alkalmazott kutatásokban Fizikai Szemle 2011/12

[27] A. Celmins: Feasibility of Cosmic-Ray Muon Intensity Measurements for Tunnel Detection U. S. ARMY Ballistic Research Laboratory, Technical Report, (1990)

- [28] A. Agócs, G. G. Barnaföldi, ..., L. Oláh, ..., D. Varga et al.: A Very High Momentum Particle Identification Detector (VHMPID) for ALICE Letter of Intent (2012)
- [29] Jeng-Wei Lin et al.: Measurment of angular distribution of cosmic-ray muon fluence rate NIM A 619, 24-27. (2010)
- [30] T. Hebbeker and C. Timmermans: A Complication of High Energy Atmospheric Muon Data at Sea Level http://arxiv.org/pdf/hep-ph/0102042 (2001)

A. A kozmikus müonok zenit-szög és impulzus eloszlása

Földünket folyamatosan bombázzák nagyenergiájú részecskék. Ezek jórészt protonok, α részecskék és a vasig bezárólag könnyebb atommagok, amelyek erősen kölcsönhatnak a légkör felső rétegeit alkotó O és N atomokkal. Ezek a nagyenergiás¹³ nehézion ütközések olyan részecskezáporokat generálnak, amelyekben főleg pionok keletkeznek. A semleges π^0 pionból két γ foton keletkezik, amelyek gyengén áthatoló elektromágneses záporokat keltenek. A π^{\pm} töltött pionok μ^{\pm} müonokra és ν_{μ} müon-neutrínókra bomlanak: $\pi^{+} \rightarrow$ $\mu^{+} + \nu_{\mu}, \pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu_{\mu}}$. A müonok átlagos élettartama $\tau_{\mu} = 2,2 \,\mu$ s, amely a klasszikus kinematikában azt jelentené, hogy a fénysebességgel haladó müonok maximum 660 m távolságra juthatnak el. Azonban az idődilatáció következtében a kozmikus müonok (~ 20 km-t megtéve) eljuthatnak a földfelszínre és a földfelszín alá is ~ 10 földekvivalens km mélységig.

A Föld felszínére függőlegesen érkező müonok hozama ~ 100 m⁻² sr⁻¹ s⁻¹ és jó közelítéssel 3-4 GeV átlagos energiával rendelkeznek. A korábbi irodalmi adatok [23] és újabbak [29] alapján a kozmikus müonok zenitszögének eloszlása a következő:

$$\phi(\vartheta) = \phi_0 \cos^n(\vartheta) \quad , \tag{11}$$

ahol $\phi(\vartheta)$ a müonhozam értéke adott ϑ zenit-szögnél ($|\vartheta| < 75^{\circ}$), ϕ_0 a müonhozam $\vartheta = 0^{\circ}$ zenit-szögnél és *n* a zenit-szög eloszlás kitevője, értéke ~ 2. A 32. ábrán látható egy laboratóriumban mért zenit-szög eloszlás 100 000 részecskével. Látható, hogy eseményszámra (*piros pontok hibákkal*) jól illeszkedik a cosⁿ-es *kék görbe*, ahol az illesztésből kapott hatványkitevő $n = 1,91 \pm 0,05$. Ez a hatványkitevő jó egyezést mutat korábbi eredményekkel [23, 29].

A kozmikus müonok impulzus
spektruma (energiaspektruma)¹⁴ a következő: $N \sim p^3$, ahol
 N a mért részecskeszám és p a kozmikus müonok impulzus
a. A 33. ábrán látható a kozmikus müonok impulzus
spektruma [30].

 $^{^{13}\}mathrm{Az}$ légkörben történő ütközések energiája több (akár 8-10) nagyságrenddel nagyobb mint az LHC laboratóriumi, proton-proton ütközéseinek $\sqrt{s} = 8$ TeV energiája (2012. 04. 05.).

¹⁴Relativisztikus közelítésben a részecskék impulzusa és energiája megegyezik.



32. ábra. Az MTA Wigner FK gázdetektor-laboratóriumában detektált kozmikus müonok zenit-szög eloszlása.



33. ábra. A kozmikus müonok impulzusspektruma [30].